



Bruno Cordeiro e Silva ¹, Marlipe Garcia Fagundes Neto ², Marcos Vinícius da Silva Rodrigues ³

RESUMO: Este trabalho apresenta a aplicação integrada do Método dos Elementos Finitos (MEF) e algoritmos genéticos na otimização de um silenciador acústico reativo. O modelo numérico foi desenvolvido para avaliar a perda de transmissão sonora na faixa de 0 a 1000 Hz, enquanto o algoritmo genético foi empregado para determinar o parâmetro geométrico ótimo. Os resultados indicaram convergência consistente da solução, com melhoria no desempenho acústico e perda de transmissão média de aproximadamente 12,29 dB. A metodologia mostrou-se eficiente na automação do processo de projeto, evidenciando seu potencial para aplicações em engenharia acústica.

Palavras-chave: silenciadores acústicos; método dos elementos finitos; algoritmo genético; otimização; perda de transmissão sonora.

INTRODUÇÃO

O controle de ruído em sistemas mecânicos é um tema de grande relevância em aplicações industriais e urbanas, especialmente em equipamentos como grupos geradores, que podem emitir níveis superiores a 100 dB. Em ambientes sensíveis, como hospitais e áreas residenciais, normas técnicas estabelecem limites significativamente mais baixos para níveis de pressão sonora, evidenciando a necessidade de soluções eficientes de atenuação acústica. Nesse contexto, os silenciadores acústicos desempenham papel fundamental na mitigação do ruído gerado por escoamentos internos.

Entre os diferentes tipos, os silenciadores reativos são amplamente utilizados devido à sua capacidade de atenuação baseada em fenômenos de reflexão e interferência de ondas sonoras, sendo particularmente eficazes em faixas específicas de frequência (Munjjal, 2014; Rao, 1983). No entanto, o desempenho desses dispositivos depende fortemente de parâmetros geométricos, como dimensões das câmaras e configurações das conexões, o que torna o processo de projeto complexo e não trivial.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido amplamente empregado na análise acústica de silenciadores, permitindo a modelagem de geometrias complexas e a resolução da equação de onda em domínios tridimensionais. Essa abordagem possibilita a obtenção de indicadores de desempenho, como a perda de transmissão sonora ao longo de uma faixa de frequências, fornecendo uma avaliação detalhada do comportamento acústico do sistema (Howard & Cazzolato, 2015;). Contudo, a elevada demanda computacional associada a simulações sucessivas limita a aplicação direta de métodos exploratórios no espaço de projeto.

Nesse cenário, técnicas de otimização baseadas em algoritmos evolutivos têm se mostrado eficazes na busca por soluções ótimas em problemas não lineares e multimodais. Os algoritmos genéticos, em particular, destacam-se por sua capacidade de explorar eficientemente o espaço de soluções sem a necessidade de derivadas, sendo amplamente aplicados em problemas de engenharia (Goldberg, 1989; Deb, 2001). Esses métodos utilizam operadores inspirados na seleção natural para evoluir populações de soluções candidatas ao longo de sucessivas gerações.

Dessa forma, a integração entre modelos acústicos em MEF e algoritmos genéticos constitui uma abordagem promissora, portanto o uso combinado de ferramentas

¹ Vínculo institucional e formação/atuação profissional

² Vínculo institucional e formação/atuação profissional

computacionais, como ANSYS e rotinas em Python, permite automatizar o processo de simulação e otimização. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia integrada para análise e otimização de um silenciador reativo simplificado, visando ao aprimoramento de seu desempenho acústico.

METODOLOGIA

O silencioso que será trabalhado será uma simplificação do real utilizado em modelos de geradores comerciais. Como ilustrado na Figura 1, a otimização será unimodal, ou seja, se concentrará em achar um diâmetro D ótimo do furo:

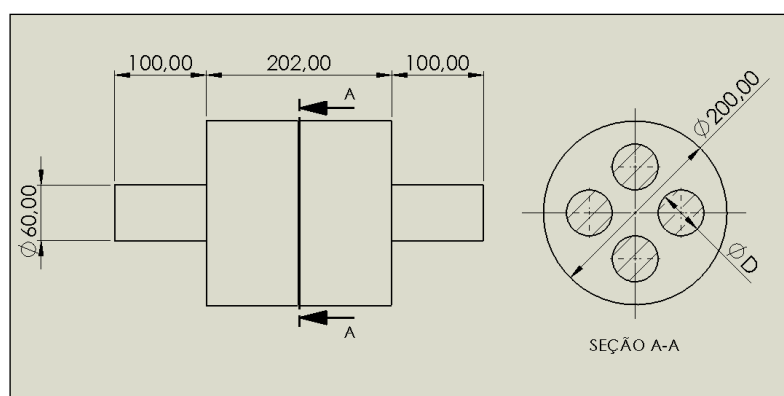


Figura 1: Desenho técnico do modelo de silencioso

Modelagem via MEF

A modelagem acústica do silenciador reativo foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), considerando um domínio tridimensional preenchido por ar, assumido como fluido homogêneo, invíscido e com comportamento linear. As propriedades acústicas foram definidas como constantes, com base em condições padrão, incluindo densidade do ar, velocidade do som e impedância característica do meio.

A geometria analisada corresponde a um silenciador reativo simplificado, composto por uma câmara de expansão conectada a dutos de entrada e saída, sendo suas dimensões parametrizadas por variáveis geométricas (diâmetros e comprimentos). Essa abordagem permite capturar os principais efeitos de reflexão e interferência de ondas acústicas, reduzindo simultaneamente o custo computacional.

A discretização do domínio foi realizada com elementos finitos tetraédricos tridimensionais apropriados para análise acústica, com quatro graus de liberdade por nó. O tamanho dos elementos foi definido em função do comprimento de onda (Howard & Cazzolato, 2015;) associado à maior frequência analisada (Equação 1), assegurando a adequada resolução espacial do problema:

$$h \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (1)$$

onde λ_{min} é o comprimento de onda associado à maior frequência analisada.

As condições de contorno foram definidas de modo a representar a propagação de ondas planas. Na entrada, foi imposta uma velocidade normal harmônica, enquanto na saída foi aplicada uma condição anecoica, utilizando a impedância característica do meio:

$$Z_0 = \rho c \quad (2)$$

O desempenho acústico foi avaliado por meio da perda de transmissão (*Transmission Loss* – TL), determinada a partir da relação entre as potências acústicas incidente e transmitida, sendo calculada ao longo da faixa de frequências de 0 – 1000 Hz.

Otimização por Algoritmo Genético

A otimização do silenciador com algoritmo genético (GA) foi realizada em ambiente Python e integrado ao modelo numérico. O objetivo consistiu em maximizar o desempenho acústico do sistema, representado pela perda de transmissão média ($\overline{TL}$) na faixa de frequências definida. Portanto buscou-se minimizar a Equação 3 em função de $\overline{TL}$ tendendo a TL_{obj} :

$$f = \frac{1}{|TL_{obj} - \overline{TL}|} \quad (3)$$

onde TL_{obj} é o valor de perda de transmissão de referência desejado adotado como 20 dB.

O algoritmo evolutivo foi conduzido por operadores de seleção, cruzamento e mutação, permitindo a busca em um espaço de soluções não linear. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros adotados no algoritmo genético:

Tabela 1: Parâmetros do Algoritmo Genético

Parâmetro	Descrição	Usado
N_{pop}	Tamanho da população	4, 6, 10
N_{gen}	Número de gerações	5, 10
N_{genes}	Número de variáveis de projeto	1
Taxa de mutação P_m	Probabilidade de mutação	5%, 10%
Método de seleção	Ex.: torneio, roleta	Torneio
Tipo de crossover	Ex.: ponto único, uniforme	Ponto único
Tipo de mutação	Ex.: aleatória, adaptativa	Aleatório

Cada indivíduo da população foi definido como um conjunto de parâmetros geométricos do silenciador, codificados como variáveis contínuas. Foram realizadas 4 rodadas de otimização variando-se os parâmetros apresentados na Tabela 1, com o objetivo de avaliar a convergência do valor final de D .

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo numérico desenvolvido apresentou tempo de processamento entre aproximadamente 10 e 20 minutos por simulação, evidenciando o custo computacional associado à análise acústica via MEF. A malha utilizada no modelo final continha cerca de 2×10^4 nós, e a Figura 2 ilustra a aparência da malha:

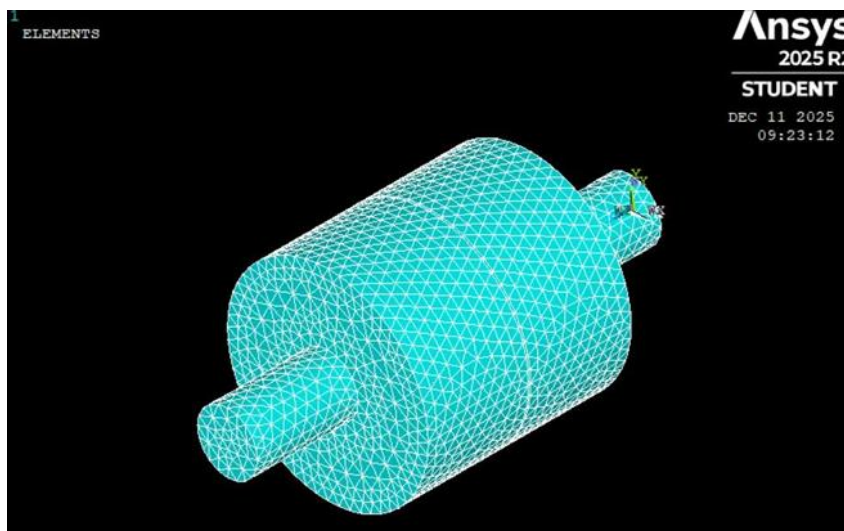


Figura 2: Malha do silencioso simulado

Os resultados das quatro rodadas de otimização com diferentes configurações do algoritmo genético estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado das rodadas de otimização

Simulação	N_{gen}	N_{pop}	P_m [%]	$D_{ótimo}$ [m]	f	$\overline{TL}$ [dB]
1	10	4	10	0,0314	0,131	12,38
2	5	6	5	0,0292	0,122	11,83
3	5	6	5	0,0319	0,133	12,48
4	10	10	10	0,0318	0,133	12,47

Observa-se que os valores ótimos do parâmetro geométrico D apresentaram convergência em torno de $D \approx 0,031m$, indicando consistência entre diferentes configurações do algoritmo. A perda de transmissão média obtida também apresentou baixa dispersão, com valor médio de aproximadamente 12,29 dB.

O comportamento acústico do silenciador otimizado é apresentado na Figura 3, que mostra a variação da perda de transmissão em função da frequência. Nota-se que o dispositivo apresenta desempenho mais significativo dentro da faixa de interesse, com valores máximos próximos de 14 dB e uma média de aproximadamente 12,29 dB

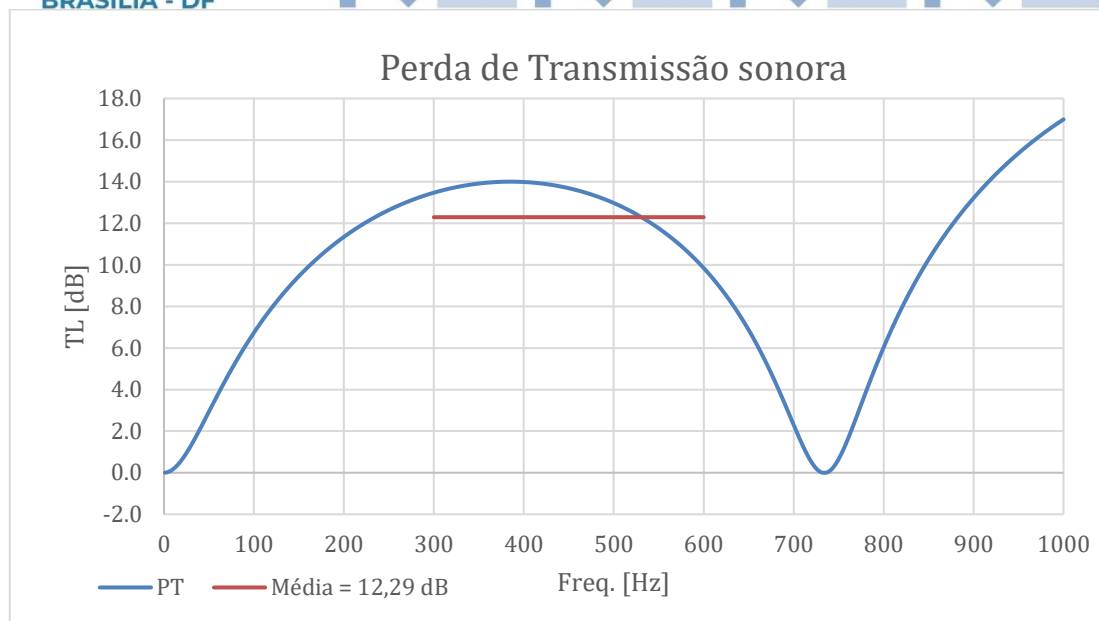


Figura 3: Gráfico da perda de transmissão sonora

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação integrada do Método dos Elementos Finitos (MEF) e algoritmos genéticos para a otimização de um silenciador acústico reativo. Os resultados indicaram convergência consistente do parâmetro geométrico otimizado ($D \approx 0,031 \text{ m}$), bem como baixa dispersão na perda de transmissão média, com valor aproximado de 12,29 dB.

O comportamento acústico obtido demonstrou desempenho relevante na faixa de frequências analisada, validando a abordagem numérica empregada. A metodologia mostrou-se eficiente na automatização do processo de projeto, mesmo diante do elevado custo computacional das simulações.

Como limitações, destacam-se a discretização da malha e a abordagem de otimização unimodal. Como trabalhos futuros, sugere-se a consideração de múltiplos parâmetros geométricos e o aprimoramento da malha, visando maior precisão e desempenho acústico.

REFERÊNCIAS

- DEB, Kalyanmoy. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- GOLDBERG, David E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989.
- HOWARD, Carl Q.; CAZZOLATO, Benjamin S. Acoustic analyses using MATLAB and ANSYS. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- MUNJAL, M. L. Acoustics of ducts and mufflers. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- RAO, K. N. Sound and structural vibration. London: Academic Press, 1983.
- ANSYS, Inc. ANSYS Acoustic Analysis Guide. 2025.